

C02班 公募研究

# 超新星ニュートリノで探る 大質量星コア構造

中村 航 (福岡大学)

堀内 俊作 (バージニア工科大学), 滝脇 知也 (国立天文台), 固武 慶 (福岡大学)

# 重力崩壊型超新星の数値シミュレーション

空間:	3次元, ~ $10^{13}$ cm (RSG全体)	1次元 or 2次元, ~ $10^9$ cm (鉄コア+Si,O層)
ニュートリノ:	Boltzmann, 詳細な反応	近似法, 簡略化した反応
重力:	一般相対論的	ニュートンの (+一般相対論近似)



多数の親星に対する系統的な計算が可能

	空間	ニュートリノ	重力	モデル数
Ugliano+'12	1次元	gray	effective GR	~100
O'Connor+'13	1次元	M1	<b>GR</b>	32
Nakamura+'15	<b>2次元</b>	IDSA+leakage	Newtonian	<b>~400</b>

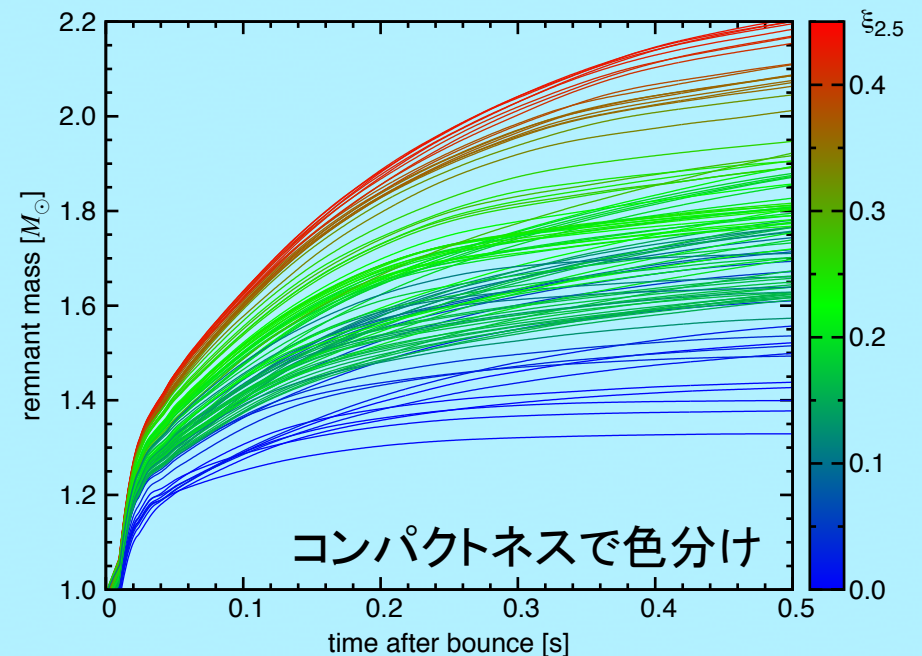
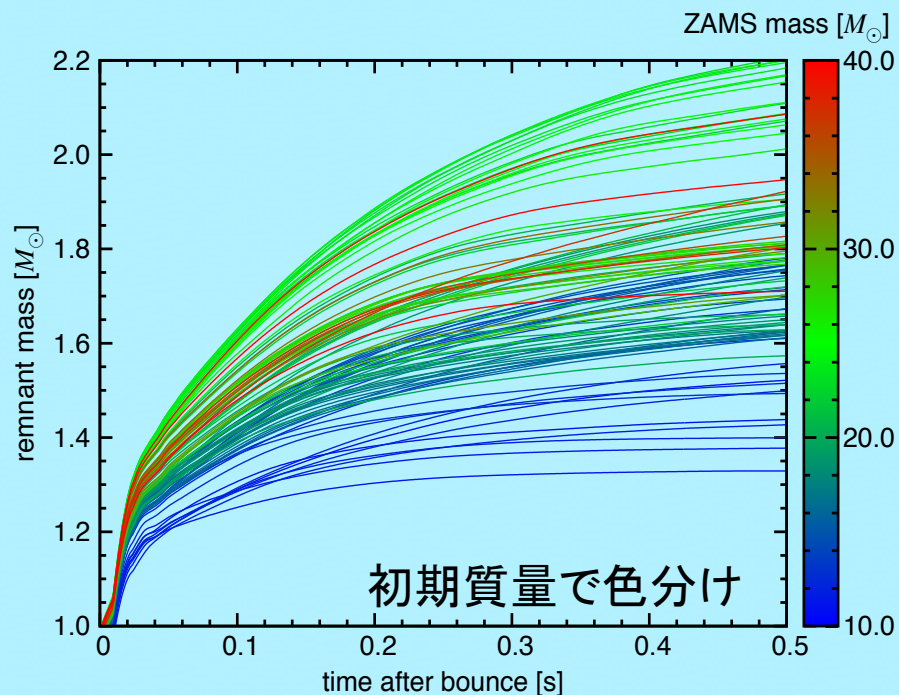
# CCSNeの系統的性質 - 中性子星質量

- ✓ 378モデルのうち太陽金属量を持つ101モデルに注目.  
他の金属量のモデルも(示していないが)傾向は同じ.
- ✓ モデルによってPNS質量に大きな差.  
軽いものは~1.3 $M_{\odot}$ , 重いものは>2 $M_{\odot}$ →一部はBHに.
- ✓ コンパクトネスで色分けすると**単調な傾向**.

**コンパクトネスパラメータ**  
(O'Connor & Ott 2011)

$$\xi_M \equiv \frac{M/M_{\odot}}{R(M)/1000\text{km}}$$

各親星の構造に対応.



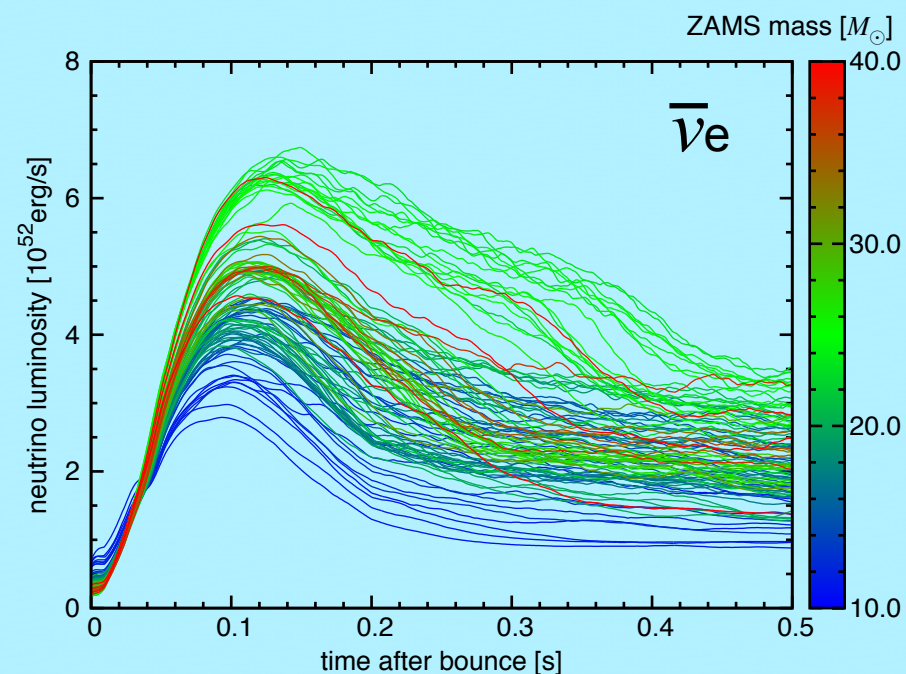
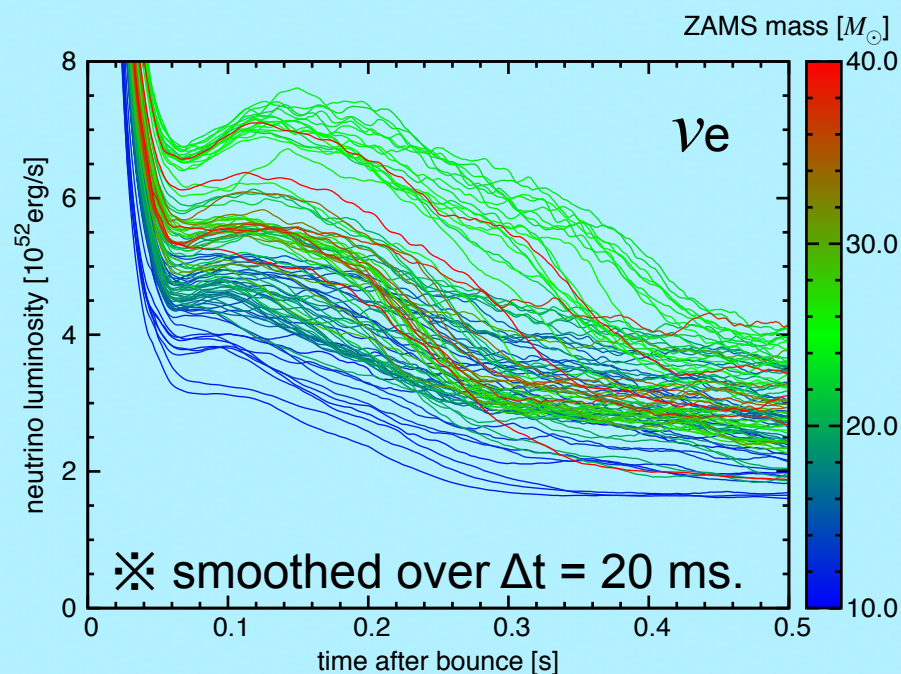
# CCSNeの系統的性質 - ニュートリノ光度

- ✓ 378モデルのうち太陽金属量を持つ101モデルに注目.  
他の金属量のモデルも(示していないが)傾向は同じ.
- ✓ モデルによってニュートリノ光度に**2倍以上の大きな差**.  
 $2-6 \times 10^{52}$  erg/s @  $t = 200$  ms.
- ✓ コンパクトネスで色分けすると**単調な傾向**.

**コンパクトネスパラメータ**  
(O'Connor & Ott 2011)

$$\xi_M \equiv \frac{M/M_\odot}{R(M)/1000\text{km}}$$

各親星の構造に対応.



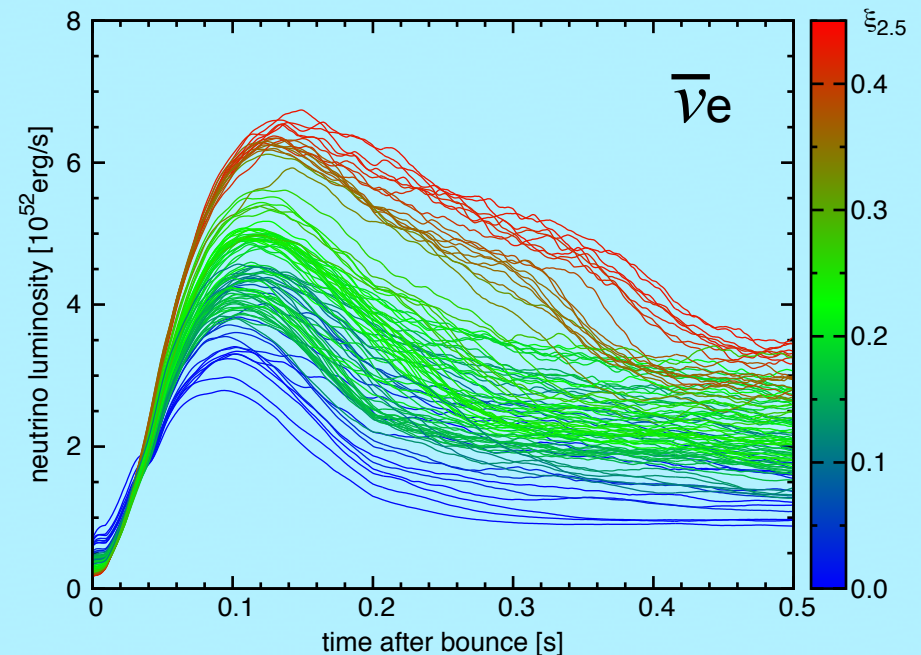
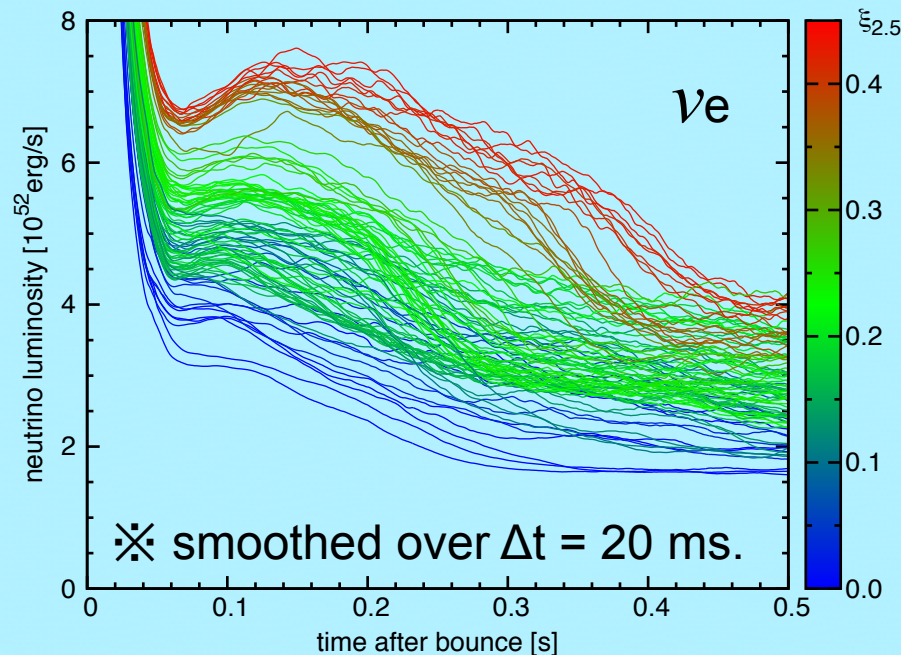
# CCSNeの系統的性質 - ニュートリノ光度

- ✓ 378モデルのうち太陽金属量を持つ101モデルに注目.  
他の金属量のモデルも(示していないが)傾向は同じ.
- ✓ モデルによってニュートリノ光度に**2倍以上の大きな差**.  
 $2-6 \times 10^{52}$  erg/s @  $t = 200$  ms.
- ✓ コンパクトネスで色分けすると**単調な傾向**.

**コンパクトネスパラメータ**  
(O'Connor & Ott 2011)

$$\xi_M \equiv \frac{M/M_\odot}{R(M)/1000\text{km}}$$

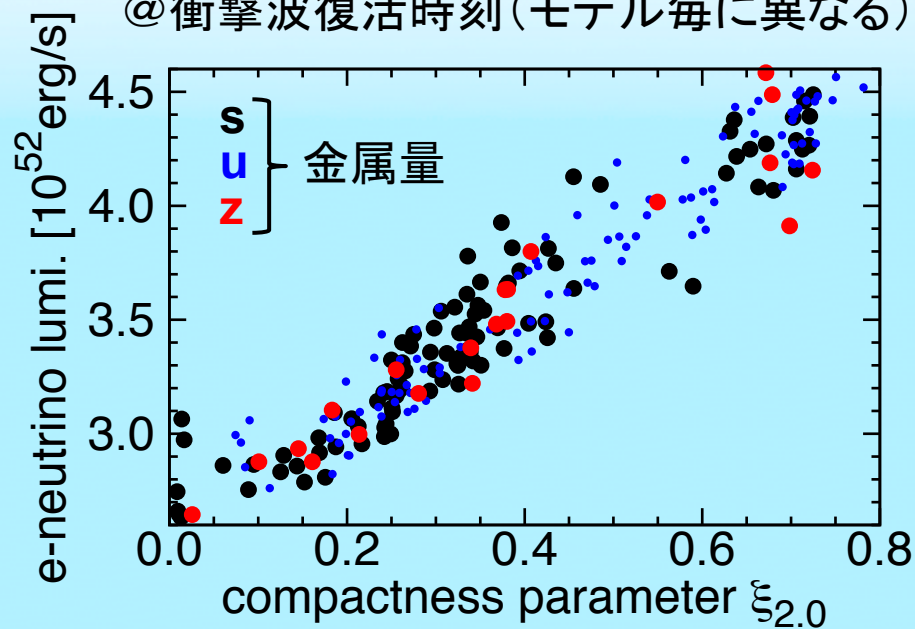
各親星の構造に対応.



# Compactness - $L_{\nu}$ , $M_{\text{PNS}}$

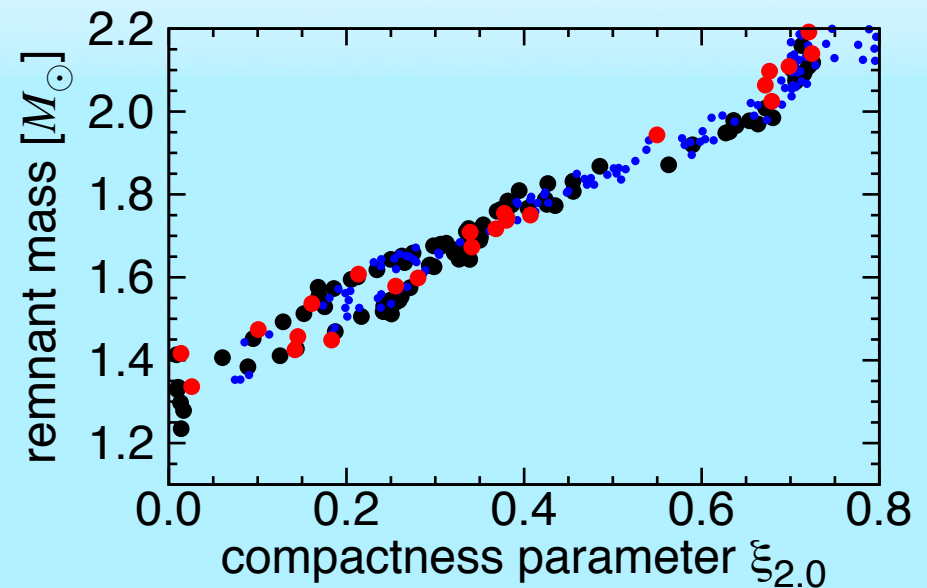
## 電子ニュートリノ光度

@衝撃波復活時刻(モデル毎に異なる)



## 原始中性子星の質量

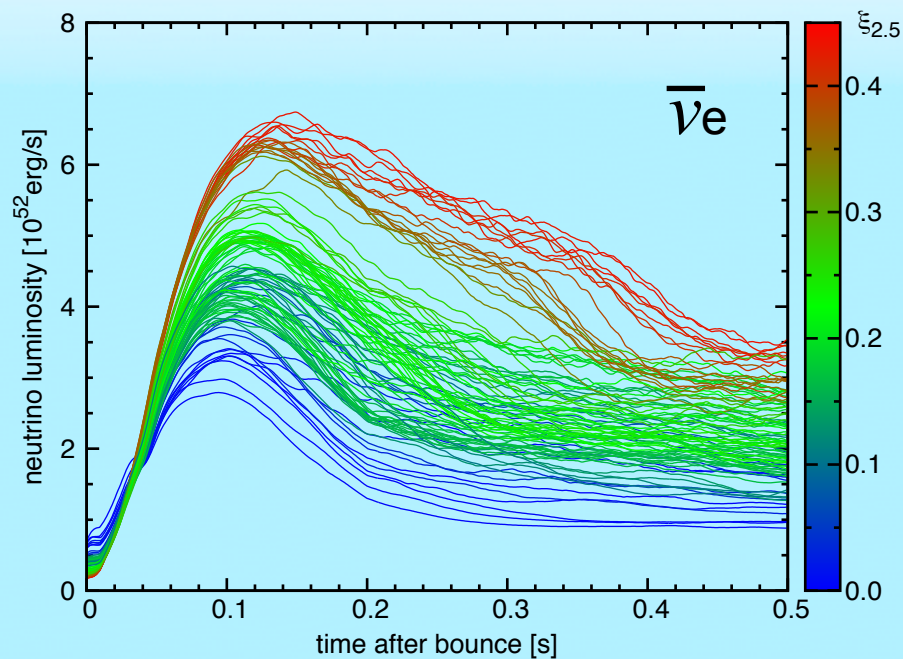
@計算の最終時刻(モデル毎に異なる)



どちらもコンパクトネスパラメータに対して良い相関を示している。

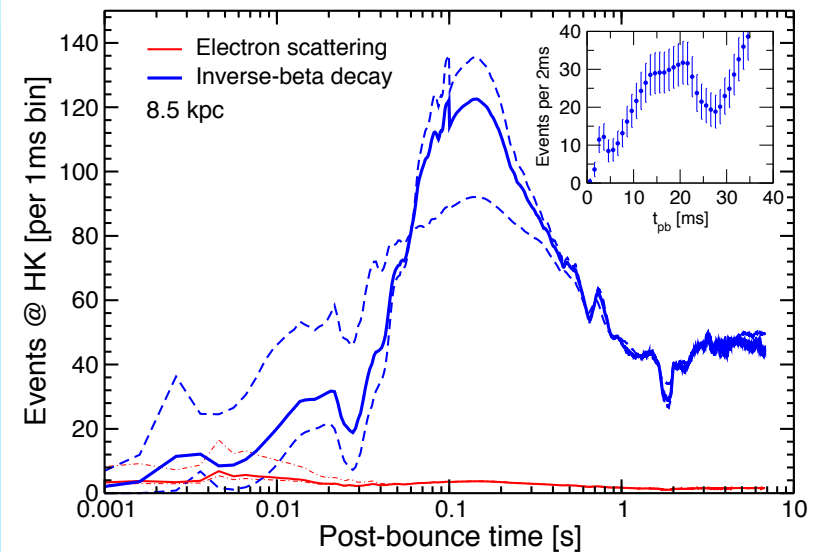
# 超新星ニュートリノ観測から親星構造を決める

数百モデルに対する  
ニュートリノ光度曲線テンプレート



例) 17太陽質量の超新星爆発が  
銀河中心で起こった場合に  
HKで期待される検出イベント数

Fig.4 in Nakamura+16



親星の内部構造(コンパクトネス)が決まる！？

# 克服しなければいけない課題

## 1) 近似(簡略化)による問題

テンプレートの信頼性.



コードを改良(TBD).

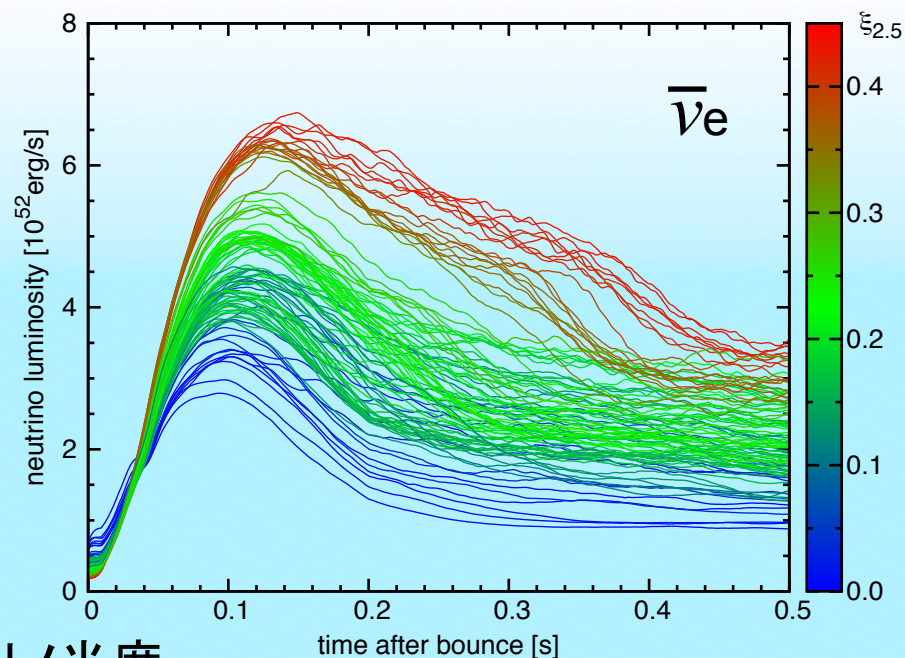
- ニュートリノ反応, 輸送の精緻化
- effective GR

## 2) 距離の不定性

検出イベント数と超新星のニュートリノ光度  
を対応させるには距離の情報が必要.  
← 爆発後に親星を同定して決定可能.  
しかし距離情報の不定性が大きい.



距離に依存しない指標が必要.





# 距離に依存しないニュートリノ指標

## ✓ 前半

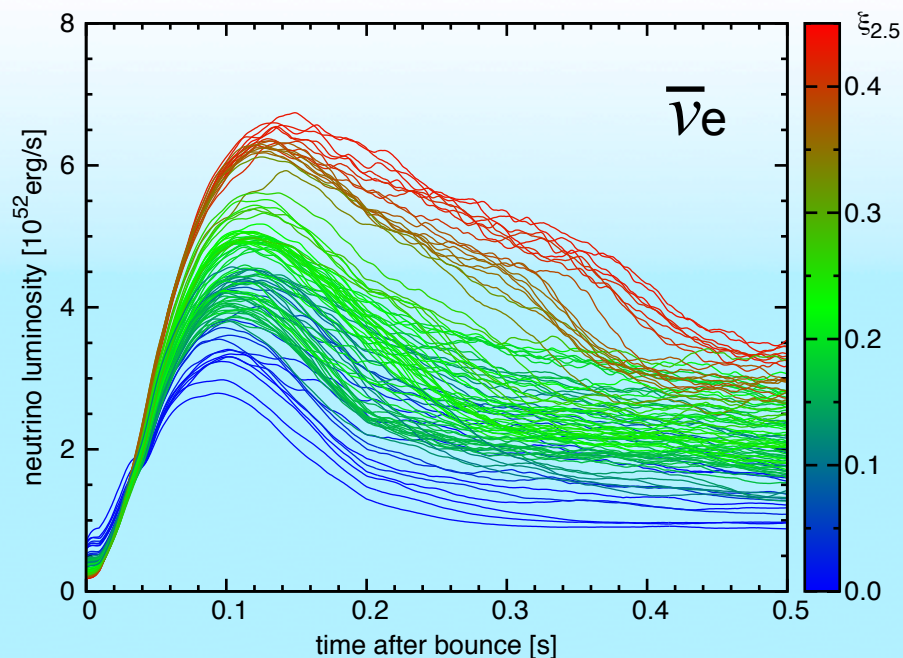
散逸ニュートリノ成分.  
コンパクトネスにあまり依存しない.

## ✓ 後半

降着ニュートリノ成分.  
コンパクトネスに強く, 単調に依存.



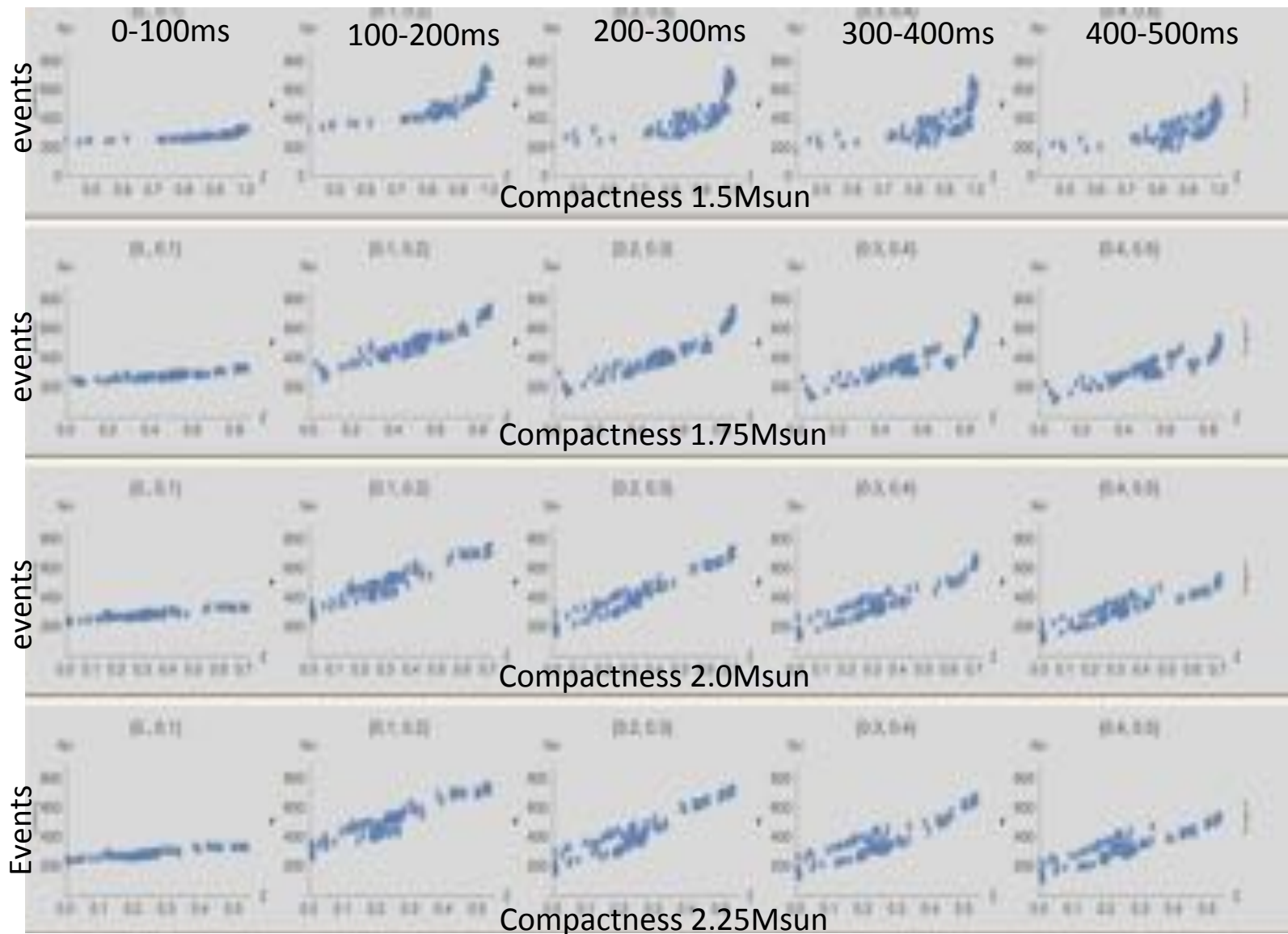
距離に依存せず, コンパクトネスに感度を持つ指標.



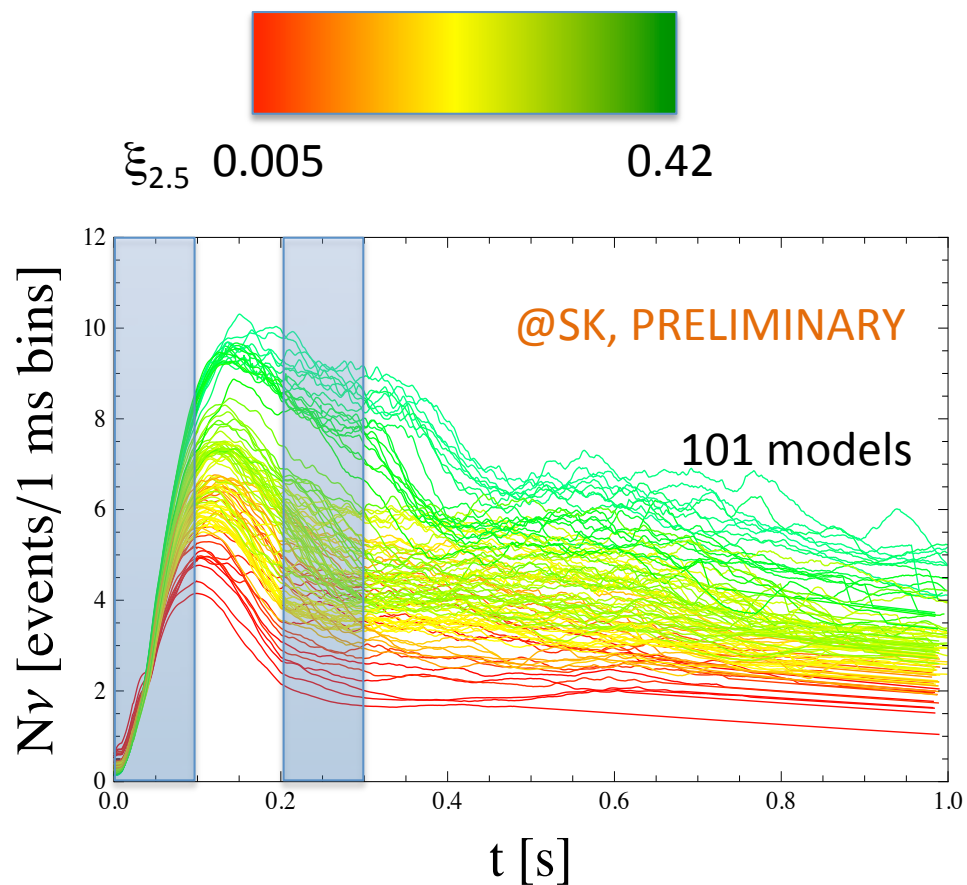
# 時間積分イベント数のパラメータ依存性

初期 ← ニュートリノ検出イベントを積分する時間帯 → 後期

外側 ← コンパクトネスを定義する場所 → 内側



# 結果 (preliminary)



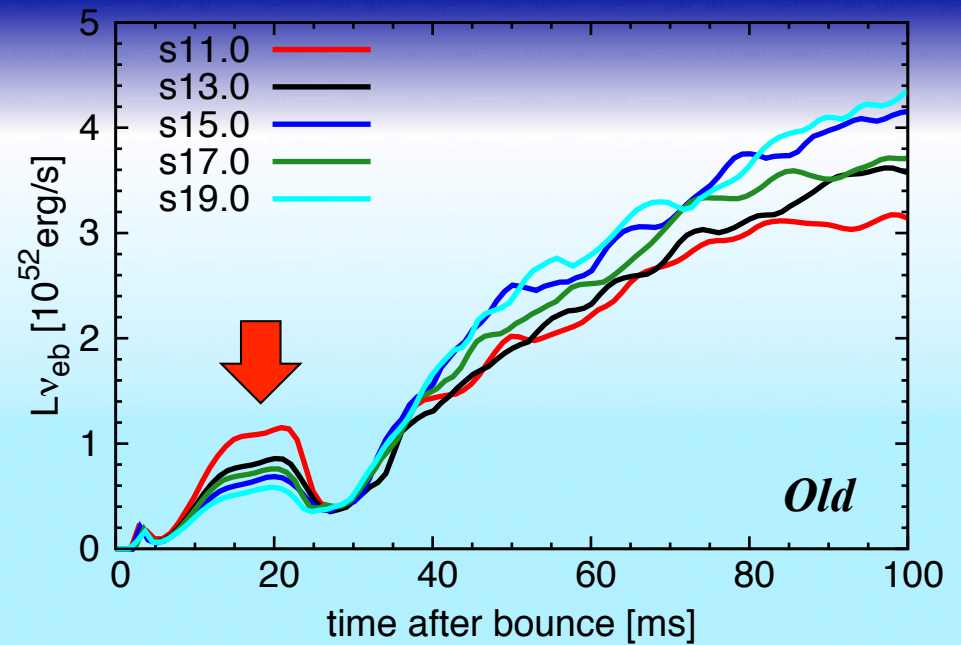
PRELIMINARY

PRELIMINARY

Hyper-Kamiokande で親星のコンパクトネスを決定可能.

# 改良すべき点と現状報告 (1)

- ✓ ニュートリノ反応  
 $\bar{\nu}_e$  の光度曲線にbump.  
これは精密計算では見えない.
- ✓  $\nu_x$   
現在は IDSA ( $\nu_e, \bar{\nu}_e$ )  
+ Leakage ( $\nu_x$ ).  
ニュートリノ振動を考慮するうえで  
 $\nu_x$  の情報が不可欠.
- ✓ 一般相対論的效果  
通常の (BHを形成しない) 爆発  
でもGR効果は無視できない.



# 改良すべき点と現状報告 (2)

- ✓ ニュートリノ反応  
 $\bar{\nu}_e$  の光度曲線にbump.  
これは精密計算では見えない.

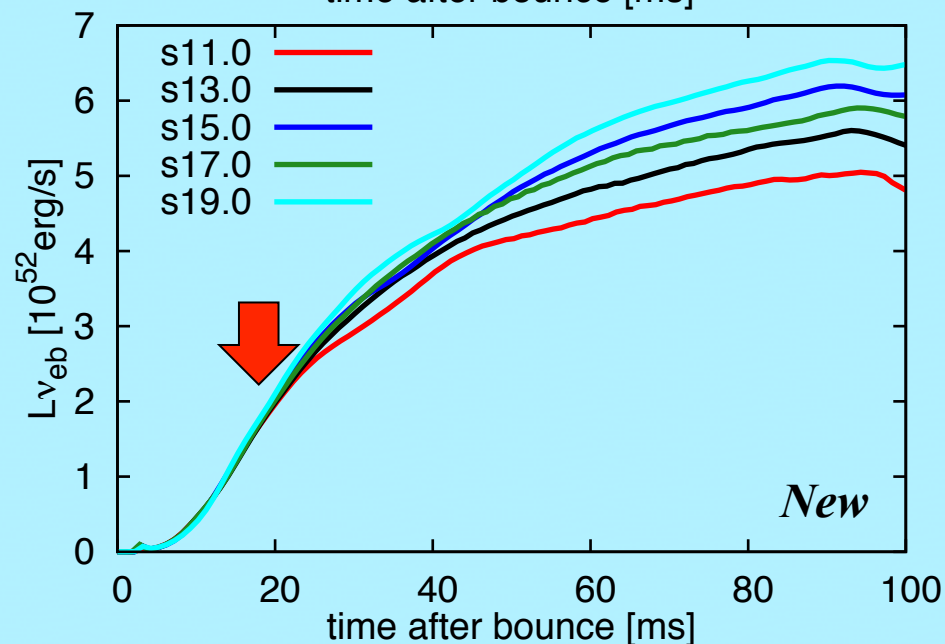
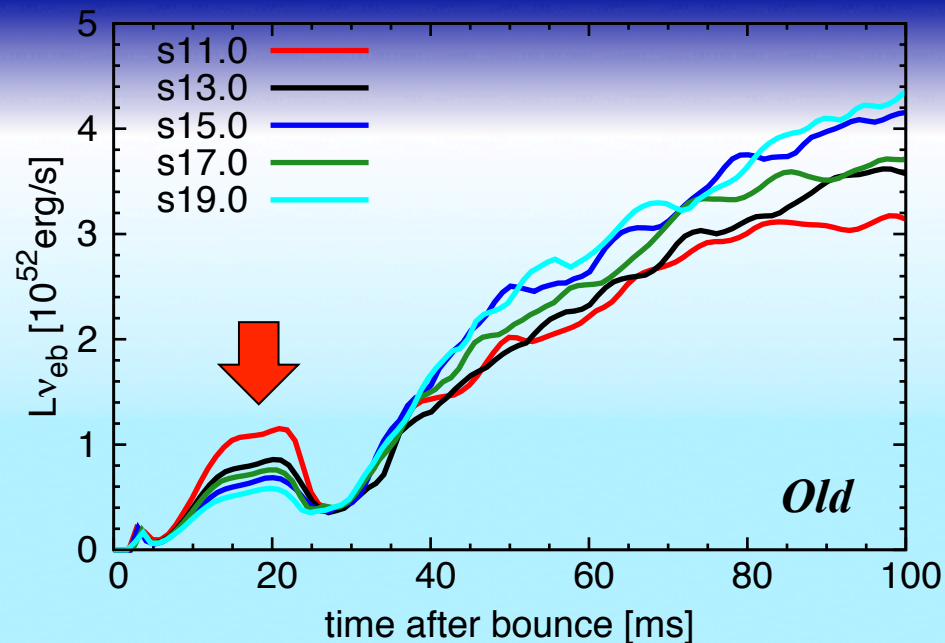
電子散乱を含む詳細な反応.  
→ bump 消えた.

- ✓  $\nu_x$   
現在は IDSA ( $\nu_e, \bar{\nu}_e$ )  
+ Leakage ( $\nu_x$ ).  
ニュートリノ振動を考慮するうえで  
 $\nu_x$  の情報が不可欠.

$\nu_x$  もIDSAで

- ✓ 一般相対論的効果  
通常の (BHを形成しない) 爆発  
でもGR効果は無視できない.

effective GR ポテンシャル



# ニュートリノ振動

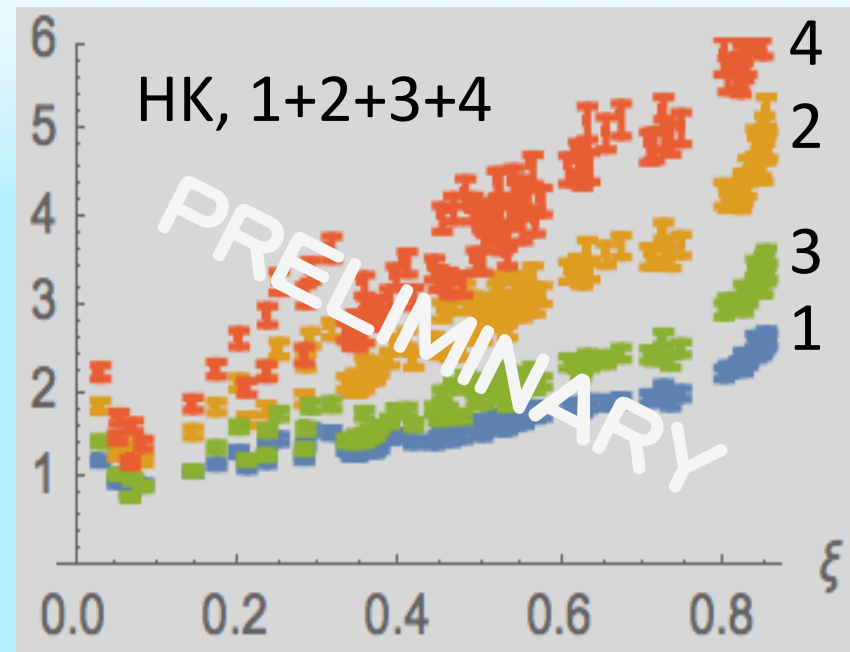
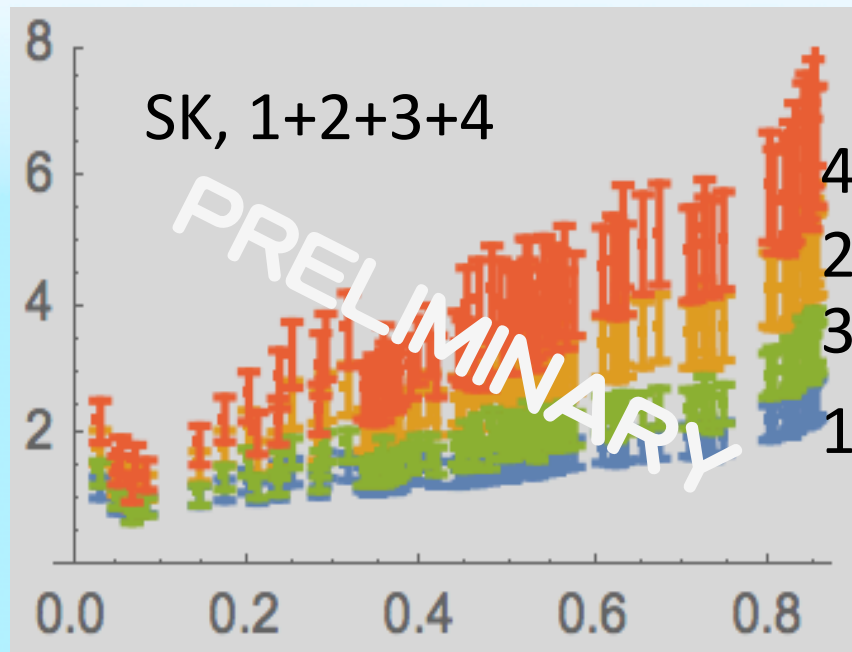
## Normal hierarchy

	Burst ( $L_{\nu e} \gg \text{others}$ )	Accretion ( $L_{\nu x} < L_{\nu e \bar{b}} < L_{\nu e}$ )
MSW		
$\nu e$	$= \nu x_0$	$= \nu x_0$
$\nu e \bar{b}$	$= 0.7 \nu e \bar{b}_0 + 0.3 \nu x_0$	$= 0.7 \nu e \bar{b}_0 + 0.3 \nu x_0$
+Collective		
$\nu e$	$= \nu x_0$	$= \nu x_0$
$\nu e \bar{b}$	$= 0.7 \nu e \bar{b}_0 + 0.3 \nu x_0$	$= 0.7 \nu e \bar{b}_0 + 0.3 \nu x_0$

## Inverted hierarchy

	Burst phase	Accretion phase
MSW		
$\nu e$	$= 0.3 \nu e_0 + 0.7 \nu x_0$	$= 0.3 \nu e_0 + 0.7 \nu x_0$
$\nu e \bar{b}$	$= \nu x_0$	$= \nu x_0$
+Collective		
$\nu e$	$= 0.3 \nu e_0 + 0.7 \nu x_0$	$= \nu x_0$
$\nu e \bar{b}$	$= \nu x_0$	$= 0.7 \nu e \bar{b}_0 + 0.3 \nu x_0$

# ニュートリノ振動



1. INV w/o collective
2. NORM
3. INV
4. No oscillation

# まとめ

- ✓ 数百個の親星を用いた数値計算によって超新星の系統的性質がわかった.
- ✓ 銀河系内の超新星ニュートリノから親星の構造(コンパクトネス)を測定したい.
- ✓ 距離に依存しない指標を使えば(HKであれば)よく決まりそう.
- ✓ ただしコード改良の必要あり.